DOI：10.7512/j.issn.1001-2303.2026.07.02

新型高强Al-Mg-Zn合金激光-TIG复合焊接头气孔抑制及力学性能研究

刘福运[1,2,3,4]，亓蔚宁[2,3]，周晓辉[2,3]，林丹阳[2,3,4]，檀财旺[2,3,4]，韩晓辉[1]，宋晓国[2,3,4]

1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司，山东 青岛 266111
2. 哈尔滨工业大学 材料结构精密焊接与连接全国重点实验室，黑龙江 哈尔滨 150001
3. 哈尔滨工业大学（威海） 山东省特种焊接技术重点实验室，山东 威海 264209
4. 山东船舶技术研究院，山东 威海 264200

摘　要：新型Al-Mg-Zn合金是轨道交通车体轻量化的核心候选材料，但其熔焊接头的气孔缺陷与软化问题尚未得到系统研究。本研究采用激光-TIG复合焊接方法对4 mm厚T6态Al-7Mg-3Zn合金开展焊接试验，通过金相观察、ImageJ图像分析、显微硬度测试及室温拉伸试验，系统研究激光功率（2.0、2.4、2.8 kW）对接头焊缝成形、气孔行为及力学性能的影响规律。结果表明，焊缝熔宽与熔深随激光功率增大而单调递增，熔宽从4.4 mm增至4.9 mm、熔深从2.8 mm增至3.5 mm。气孔率随激光功率增大呈现先降后升的非单调变化：2.0 kW时为0.87%，2.4 kW时降至最低值0.66%，2.8 kW时急剧升至2.28%。低功率阶段熔池体积扩大和冷却速率减缓促进气泡逸出，高功率阶段Mg、Zn等低沸点元素剧烈蒸发引发匙孔失稳坍塌。接头力学性能与气孔率呈负相关，2.4 kW时接头综合力学性能最优，抗拉强度达298.32 MPa，延伸率为10.23%，热影响区软化程度最低为16.9%。研究结果可为新型Al-Mg-Zn合金在轨道交通领域的焊接工艺优化提供理论依据。

关键词：Al-Mg-Zn合金；激光-TIG复合焊；激光功率；气孔率；力学性能

中图分类号：TG457.11　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-2303（2026）07-0010-07

Study on the Influence Mechanism of Porosity Defects in Laser-TIG Hybrid Welded Joints of New Al-Mg-Zn Alloy

LIU Fuyun[1,2,3,4], QI Weining[2,3], ZHOU Xiaohui[2,3], LIN Danyang[2,3,4], TAN Caiwang[2,3,4], HAN Xiaohui[1], SONG Xiaoguo[2,3,4]

1. CRCC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China
2. State Key Laboratory of Precision Welding and Joining of Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China
3. Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, China
4. Shandong Institute of Shipbuilding Technology, Weihai 264200, China

Abstract: The new-type Al-Mg-Zn alloy is a core candidate material for lightweight rail transit car bodies, yet the porosity defects and softening issues of its fusion-welded joints remain insufficiently investigated. In this study, laser-TIG hybrid welding was applied to 4 mm thick T6-tempered Al-7Mg-3Zn alloy. The effects of laser power (2.0, 2.4, 2.8 kW) on weld bead formation, porosity behavior, and mechanical properties were systematically investigated by means of metallographic observation, ImageJ image analysis, microhardness testing, and room-temperature tensile testing. The results show that both the weld width and penetration depth increase monotonically with laser power, from 4.4 mm to 4.9 mm and from 2.8 mm to 3.5 mm, respectively. The porosity exhibits a non-monotonic trend of first decreasing then increasing with laser power: 0.87% at 2.0 kW, dropping to a minimum of 0.66% at 2.4 kW, and then sharply rising to 2.28% at 2.8 kW. This non-

收稿日期：2025-12-26　　**修回日期：**2026-01-19
基金项目：国家重点研发计划（2023YFB3710400）
作者简介：刘福运（1995—），男，博士，助理研究员。主要从事轻质合金激光焊接及智能焊接研究。E-mail：liufuyun_laser@163.com。

monotonic porosity variation is governed by the competing mechanism between molten pool dynamics and keyhole stability — at lower power levels, the enlarged molten pool volume and reduced cooling rate facilitate bubble escape, while at higher power levels, severe evaporation of low-boiling-point elements (Mg, Zn) induces keyhole instability and collapse. The mechanical properties of the joints are significantly and negatively correlated with porosity. At 2.4 kW, the joint achieves the best comprehensive performance, with an ultimate tensile strength of 298.32 MPa, an elongation of 10.23%, and the minimum HAZ softening degree of 16.9%. The findings can provide theoretical guidance for welding process optimization of the new Al-Mg-Zn alloy in rail transit applications.

Keywords: Al-Mg-Zn alloy; laser-TIG hybrid welding; laser power; porosity; mechanical properties

引用格式：刘福运，亓蔚宁，周晓辉，等. 新型高强Al–Mg–Zn合金激光–TIG复合焊接头气孔抑制及力学性能研究[J]. 电焊机，2026，56(7)：10–16.

Citation: LIU Fuyun, QI Weining, ZHOU Xiaohui, et al. Study on the Influence Mechanism of Porosity Defects in Laser–TIG Hybrid Welded Joints of New Al–Mg–Zn Alloy[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(7): 10–16.

0　引言

在轨道交通领域，轻量化已成为延长设备服役寿命、提升装备运行安全性、增强经济效益的必然趋势与核心需求，亦是该领域实现可持续发展的关键方向[1-2]。对于高速列车而言，车体铝合金型材作为核心承力结构件，其性能直接决定整车服役可靠性。传统高铁用6系、7系铝合金因比强度不足、焊接接头易软化及焊接缺陷敏感性偏高等问题，难以满足新一代高速列车的要求。新型Al–Mg–Zn合金凭借优异的比强度与良好成形能力，成为实现高铁车体轻量化与高可靠性的核心候选材料。然而，该合金作为新型高强铝合金，其熔焊过程中的气孔、裂纹等焊接缺陷敏感性尚未得到系统研究，其焊接性仍处于探索阶段，这一技术瓶颈严重制约了其在轨道交通领域关键的工程化应用。

激光–TIG复合焊接技术兼具激光焊接的高能量密度、深熔透能力与TIG焊接的桥接性好、工艺稳定性高等优点[3]，可显著提升焊接过程稳定性并改善焊缝成形质量，在铝合金焊接领域展现出独特优势[4]。卢帅[5]等采用激光–TIG复合焊研究电弧电流对5 mm厚6061铝合金焊缝成形与性能的影响，结果表明，与TIG焊相比，复合焊能有效改善焊缝成形并提高接头硬度，复合焊焊缝中心区域的平均硬度为66.91 HV，提高约13.1%。张正浩等[6]针对4 mm厚2219铝合金展开了激光–TIG复合焊接试验，发现固定电弧电流时，激光功率较小时焊缝未焊透，且受限于未焊透焊缝的熔池特点，熔池内部的气体难以及时逸出，从而导致焊缝气孔率较高；当激光功率增至2.4 kW时，获到了表面成形良好、无裂纹缺陷的焊接接头。尽管激光–TIG复合焊接技术显著优化了铝合金的焊接成形，但气孔缺陷仍是制约接头质量的核心问题。

铝合金具有高反射率、高导热率等特性，深熔焊时形成匙孔，显著提升了对激光能量的吸收[7]；但匙孔易发生剧烈波动，引发尾部闭合现象，诱导工艺型气孔缺陷的形成[8]。Ola[9]等人研究了激光–电弧复合焊接AA2024–T3铝合金过程中的气孔行为，结果表明，工艺型气孔主要由金属蒸气反作用力导致匙孔坍塌形成，当焊缝金属的凝固速度快于小孔坍塌形成的气泡的上升速度时，孔隙率更为严重，是限制该类时效硬化铝合金激光–电弧复合焊接性能的主要问题。刘晓红[10]采用低功率激光–TIG复合焊焊接3 mm厚6061–T6铝合金，发现随着激光功率的增加，气孔率先增后减，且焊缝根部存在大尺寸气孔缺陷。这些气孔不仅减小了有效承载面积，还会引起应力集中并成为裂纹源，严重降低接头的力学性能和服役寿命。因此，系统阐明气孔的形成机制及其影响规律，对优化焊接工艺、提升接头性能具有重要的工程意义。

本研究以新型Al–7Mg–3Zn合金为对象，采用激光–TIG复合焊，系统探究了激光功率（2.0、2.4、2.8 kW）对接头焊缝成形、气孔率及力学性能的影响规律，深入分析气孔的形成与抑制机理，为优化该类高强铝合金的焊接工艺提供理论依据和实践指导。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为新型Al–7Mg–3Zn合金，化学成分如表1所示，板材尺寸为120 mm×60 mm×4 mm，热处理状态为T6态。表2为母材的力学性能，抗拉强度达440.7 MPa。

表1 Al-7Mg-3Zn合金的化学成分（质量分数，%）

Table 1 Chemical composition of Al-7Mg-3Zn alloy（wt. %）

Mg	Zn	Zr	Si	Fe	Mn	Ti	Cu	Cr	Al	Mg/Zn
7.0	3.0	0.1	0.15	0.05	0.15	0.03	0.004	<0.002	余量	2.33

表2 Al-7Mg-3Zn合金母材的力学性能

Table 2 Mechanical properties of Al-7Mg-3Zn alloy base metal

显微硬度/HV	拉伸强度/MPa	延伸率/%
122.7	440.7	16.40

1.2 试验设备及方法

本试验搭建激光–TIG复合焊接系统，由YLS–6000激光器、Phoenix 401 puls MM FDW多功能弧焊机、焊接行走平台以及控制系统组成。激光波长为1 070 nm，额定功率6 kW。多功能弧焊机在交流反接模式下最大输出电流为500 A。焊接行走平台的速度调节范围为1~50 mm/s。

图1为激光–TIG复合焊示意图。本试验采用激光先导的方式，TIG焊枪与母材夹角固定为60°，钨极与母材相距5 mm，钨极与激光束间距离为5 mm。焊接过程中，激光光束处于聚焦状态，焦点位置设置在工件表面，焦点处光斑直径为0.6 mm。为避免高反射率的铝合金在焊接过程中反射激光束破坏光路元件，将激光头偏离垂直方向5°。焊接电流采用频率50 Hz的交流模式。保护气体为纯度99.99%的氩气，具体焊接工艺参数如表3所示。焊接前，使用角磨机打磨去除铝合金表面的氧化膜，然后用无水乙醇清洗表面油污与杂质，最后进行烘干处理。

按照ASTM E340–15标准制备金相试样。使用线切割机切取垂直于焊接方向、宽度15 mm、平行于焊缝方向5 mm的金相试样。依次使用400#、800#、1000#、2000#砂纸打磨至待观察表面无明显划痕，随后抛光至镜面。使用Keller试剂腐蚀18 s，腐蚀后及时用清水和无水乙醇清洗并烘干。将处理好的金相试样置于OLYMPUS DSX510显微镜下观察，获取焊接接头的截面形貌及显微组织。

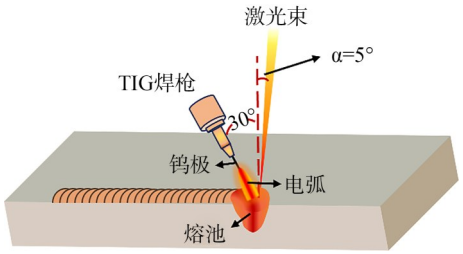


图1 激光-TIG复合焊示意

Fig. 1 Schematic diagram of laser-TIG hybrid welding

表3 激光-TIG复合焊工艺参数

Table 3 Laser-TIG hybrid welding process parameters

试验序号	激光功率/kW	焊接电流/A	焊接速度/(m·min^{-1})	保护气流量/(L·min^{-1})
1	2.0	130	2	15
2	2.4	130	2	15
3	2.8	130	2	15

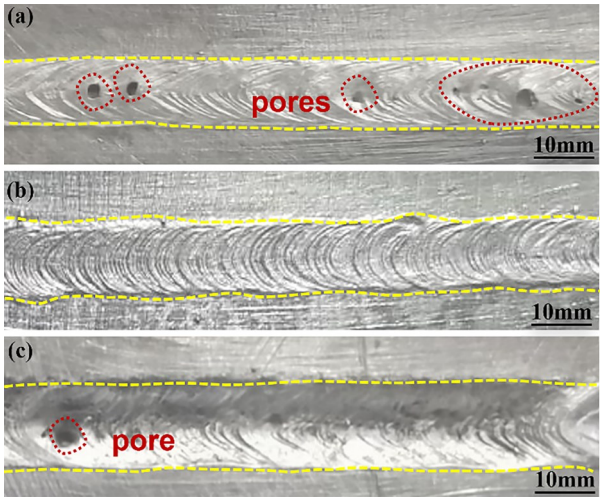
采用研润HMAS–D1000Z全自动硬度计测量维氏硬度。测试区域覆盖焊缝、热影响区和母材，加载载荷0.98 N，保载时间10 s，相邻测点间距0.2 mm。拉伸测试采用UTM4204X电子万能试验机，拉伸速度为2 mm/min。为消除误差，每种工艺参数下制备3个试样进行拉伸试验，取平均值作为最终抗拉强度和延伸率。

2 试验结果与讨论

2.1 激光功率对焊缝成形和气孔的影响

图2为不同激光功率下Al–7Mg–3Zn合金激光–TIG焊接头的表面形貌。在不同激光功率下，焊缝表面光亮，无明显飞溅和咬边缺陷。当激光功率为2 kW和2.8 kW时，焊缝表面成形不均匀，存在较多的气孔；当激光功率为2.4 kW时，焊缝呈现规则的鱼鳞纹特征，无明显的气孔、凹坑等缺陷，表面成形质量较好。

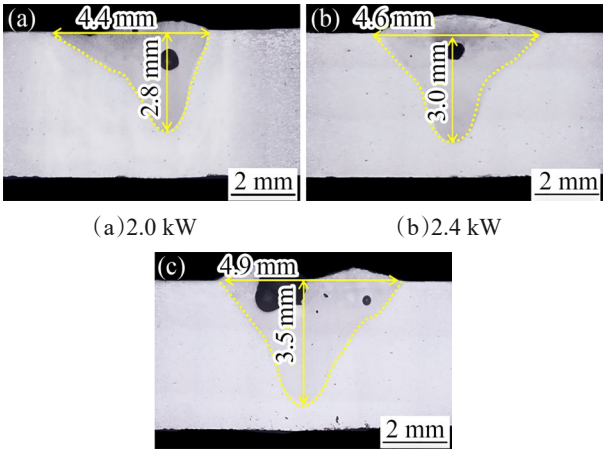
图3为不同激光功率下Al–7Mg–3Zn合金激光–TIG焊焊缝横截面形貌。随激光功率从2.0 kW增大到2.8 kW，熔宽从4.4 mm增大到4.9 mm，熔深从2.8 mm增大到3.5 mm。此外，各激光功率下的接头均存在气孔缺陷，当激光功率增至2.8 kW时，焊缝内出现大尺寸不规则气孔，局部气孔尺寸达到0.4 mm以上。图4为焊缝深宽比与横截面面积随激光功率



(a)2.0 kW；(b)2.4 kW；(c)2.8 kW

图 2　不同激光功率下 Al-7Mg-3Zn 合金激光-TIG 复合焊接头表面形貌特征

Fig. 2　Surface morphology characteristics of Al-7Mg-3Zn alloy Laser-TIG hybrid weld heads under different laser powers



(a)2.0 kW　　(b)2.4 kW

(c)2.8 kW

图 3　不同激光功率下 Al-7Mg-3Zn 合金激光-TIG 复合焊焊缝横截面形貌

Fig. 3　Cross-sectional morphology of Al-7Mg-3Zn alloy laser-TIG hybrid welds under different laser powers

的变化规律。由图 4 可知，焊缝的深宽比从 0.64 增大至 0.71，且焊缝横截面积也随激光功率增大而增大。这是由于激光功率增加，焊接过程中的总热输入增大，使焊接区域内母材的熔化总量增加，最终表现为熔宽、熔深的同步增大及横截面积的递增。

为探究激光功率对气孔敏感性的影响，对 4 mm 厚 Al-7Mg-3Zn 合金焊接接头纵截面进行观察分析，结果如图 5a1、5b1、5c1 所示。当激光功率为 2.0 kW 时，焊缝内气孔多为近圆形或椭圆形，尺寸均不大

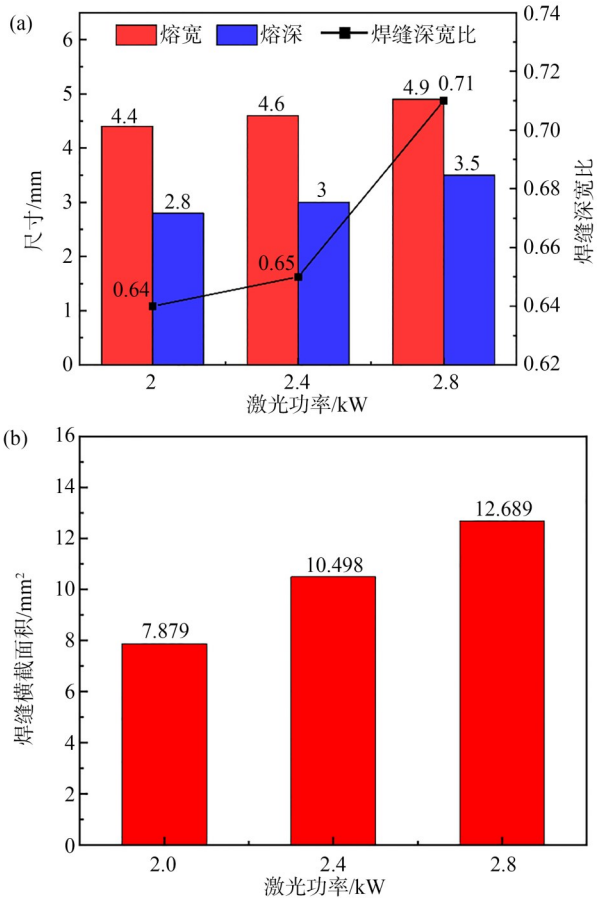


图 4　激光功率对焊缝成形的影响

Fig 4　Effect of laser power on weld bead formation

于 0.3 mm，数量相对较多且呈孤立分布状态，主要集中于焊缝上部区域，无明显聚集特征；激光功率提升至 2.4 kW 时，气孔数量减少，仅见少量类圆形微小气孔，整体呈零星弥散分布，无大尺寸气孔缺陷；激光功率进一步增至 2.8 kW 时，气孔缺陷明显增多且加剧。气孔形态呈现多样化，除球形气孔外，出现了部分不规则形状的气孔。气孔尺寸显著增大，局部可见直径超过 0.4 mm 的大型气孔。同时，气孔的分布密度增加，在焊缝局部区域出现气孔聚集现象，形成了缺陷富集区。

将拍摄的纵截面图像导入 Adobe Photoshop 软件进行处理，得到图 5a2、5b2、5c2。使用 ImageJ 图像分析软件提取焊缝纵截面上的气孔轮廓并标定气孔面积，以气孔面积除以焊缝纵截面总面积得到气孔率。气孔率随激光功率的变化如图 6 所示，气孔率随激光功率的增大呈现先降后升的趋势。激光功率从 2.0 kW 增大至 2.4 kW 时，气孔率由 0.87%

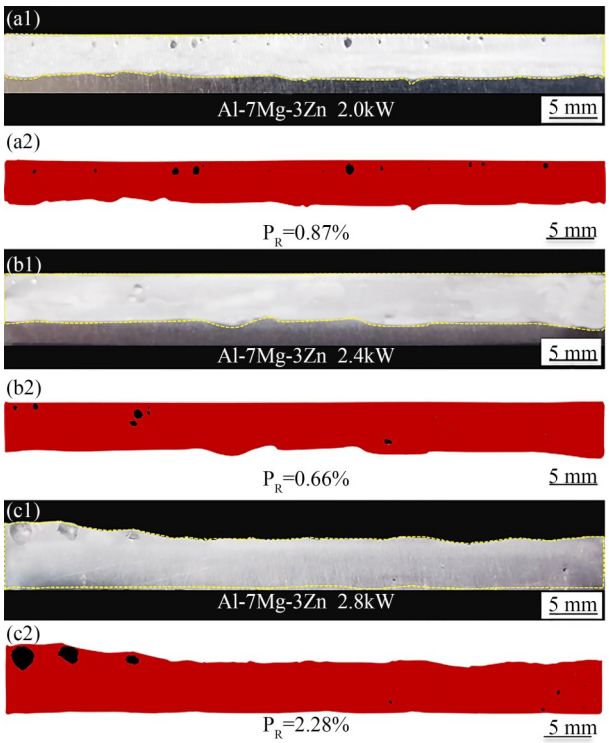


图5　不同激光功率下复合焊接头纵截面

Fig. 5　Longitudinal cross-section of composite welded joint under different laser powers

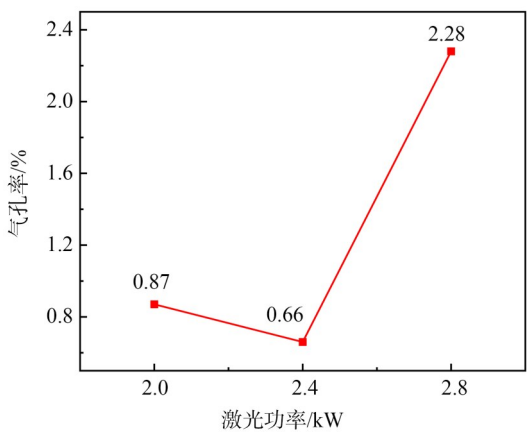
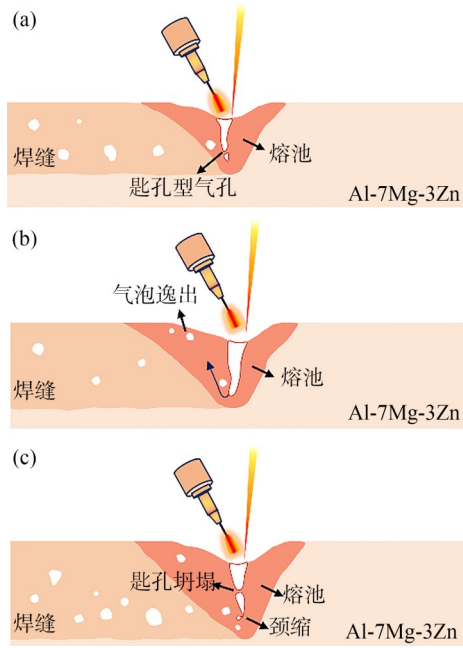


图6　气孔率随激光功率变化

Fig. 6　Line graph showing porosity variation with laser power

降至0.66%；随激光功率进一步增至2.8 kW，气孔率增大至2.28%。

气孔率的变化与熔池行为及匙孔稳定性密切相关[11]。图7为气孔产生机理示意图。激光功率为2.0 kW时，熔池体积小、冷却速度快，熔池内氢气来不及逸出，气泡易滞留形成气孔。激光功率提升至2.4 kW时，焊缝呈现规则的鱼鳞纹形貌，成形质量最优，焊接过程稳定；焊缝横截面积增至10.498 mm^2，熔池体积同步增加，熔池冷却速率减缓，同时高能量密度的激光对熔池搅拌作用增强，气泡逸出通道畅通，气孔率显著降低[12]。激光功率超过2.4 kW后，过高的能量输入导致熔池稳定性降低，焊缝表面成形不均匀。该功率下金属蒸发加剧，尤其是Mg、Zn等低沸点元素大量蒸发，使熔池上方蒸气压力升高，引发匙孔剧烈波动，增加了匙孔坍塌形成气孔的风险；同时蒸发产生的气体难以完全逸出，导致气孔率再度上升[13-14]。



(a)2.0 kW；(b)2.4 kW；(c)2.8kW

图7　气孔产生机理

Fig. 7　Mechanism diagram of pore formation

2.2　复合焊接头力学性能

焊接接头力学性能与焊缝气孔率呈显著关联，气孔率的变化可直接反映在接头抗拉强度、显微硬度及延伸率等力学性能指标的波动上[1]。

图8为不同激光功率下焊接接头的显微硬度分布。从图中可以看出，焊缝和热影响区中均存在接头软化现象，软化最严重的区域位于焊缝中心。从母材向焊缝中心方向，硬度呈现先下降—再小幅回升—后再次下降的变化规律。初始阶段，随距焊缝中心距离减小，硬度逐渐降低至热影响区的硬度最低点；越过该点后硬度出现小幅回升，进入焊缝区域后则再次下降，直至焊缝中心达到整个接头的硬度最低值。此外，随激光功率的增大，接头显微硬

度呈现先升后降的趋势，2.4 kW时接头软化程度最低。由图8可知，激光功率2.0 kW时，热影响区最低硬度为93.2 HV，焊缝最低硬度为80.7 HV，软化程度为24%；激光功率增大至2.4 kW时，热影响区最低硬度为102.0 HV，焊缝中心硬度为93.5 HV，软化程度降至16.9%；激光功率增大至2.8 kW后，热影响区最低硬度为101.7 HV，焊缝最低硬度为89.8 HV，软化程度为17.1%。

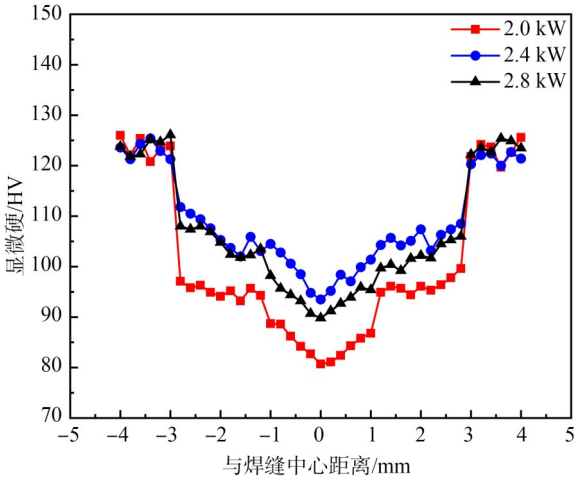


图8　不同激光功率下复合焊接头的显微硬度

Fig. 8　Microhardness of composite welded joints under different laser powers

图9为不同激光功率下接头的抗拉强度和延伸率。在激光功率2.0 kW时，抗拉强度和延伸率分别为291.07 MPa和9.86%；激光功率增大至2.4 kW时，抗拉强度和延伸率分别为298.32 MPa和10.23%；在激光功率2.8 kW时，抗拉强度和延伸率降至260.19 MPa

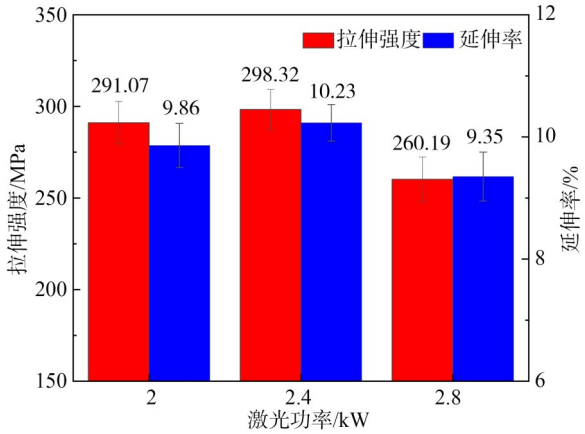


图9　不同激光功率下复合焊接头拉伸性能

Fig. 9　Tensile properties of composite welded joints under different laser powers

和9.35%，力学性能显著恶化。这是由于焊缝中的气孔作为非承载性缺陷，会直接减小接头的有效承载面积，导致单位面积承受的应力大幅增加，最终引发接头早期断裂。此外，气孔作为应力集中源，其尖端的应力集中系数随气孔尺寸增大而显著提升。拉伸过程中，应力优先在气孔尖端聚集，当集中应力超过材料的断裂强度时，会率先萌生微裂纹[15]；特别是激光功率2.8 kW时，多气孔形成的缺陷簇会使微裂纹快速连接、扩展，加速接头断裂，导致延伸率大幅下降。

3　结论

本试验以T6态Al-7Mg-3Zn合金为研究对象，采用激光-TIG复合焊，研究了激光功率（2.0、2.4、2.8 kW）对接头焊缝成形、气孔缺陷及力学性能的影响规律，主要结论如下：

（1）随激光功率从2.0 kW增大至2.8 kW，焊接热输入增加，焊缝熔宽和熔深分别从4.4 mm和2.8 mm增大至4.9 mm和3.5 mm，深宽比从0.64提升至0.71。激光功率为2.4 kW时，焊缝表面成形良好，呈现均匀的鱼鳞纹特征；功率继续增大至2.8 kW后，焊缝表面成形不均匀，出现气孔等缺陷。

（2）Al-7Mg-3Zn合金激光-TIG复合焊接头的气孔率随激光功率的增大呈现先降后升的变化趋势。激光功率为2.4 kW时气孔率最低，为0.66%，较2.0 kW时的0.87%降低了24.1%。低功率阶段，熔池体积较大且冷却速度较慢，有利于熔池中气泡的逸出；高功率阶段，Mg、Zn等低沸点元素蒸发加剧，导致匙孔稳定性降低，匙孔坍塌形成的气泡被凝固金属捕获，气孔率显著升高。

（3）接头力学性能与气孔率呈显著负相关。激光功率为2.4 kW时，接头综合力学性能最优，抗拉强度为298.32 MPa，延伸率为10.23%，热影响区软化程度最低，为16.9%。激光功率增大至2.8 kW后，焊缝中大尺寸气孔增多，有效承载面积减小，同时气孔处产生应力集中，加速微裂纹的萌生与扩展，抗拉强度降至260.19 MPa，延伸率降至9.35%。

（4）综合焊缝成形、气孔率及力学性能，2.4 kW为本文试验条件下的最优激光功率，研究结果可为

新型Al–Mg–Zn合金在轨道交通领域的焊接工艺制定提供参考。

参考文献：

[1] 刘洋，张志毅，韩晓辉，等. 6082–T6铝合金激光–MIG复合焊工艺与微气孔缺陷[J]. 焊接，2025(7)：60–67.
LIU Y，ZHANG Z Y，HAN X H，et al. Laser–MIG hybrid welding process and micro–pores defects of 6082–T6 aluminum alloy[J]. Welding & Joining，2025(7)：60–67.

[2] 郝晓杰. 激光–MIG复合焊接中厚板6005A铝合金疲劳断裂及机理研究[D]. 北京：北京化工大学，2025.
HAO X J. Study on fatigue fracture and mechanism of 6005A aluminum alloy medium–thick plate in laser–MIG hybrid welding[D]. Beijing：Beijing University of Chemical Technology，2025.

[3] 康泽军，李先芬，许新猴，等. 铝合金激光–TIG复合焊接工艺研究[J]. 制造技术与机床，2016(7)：106–109.
KANG Z J，LI X F，XU X H，et al. Study on laser–TIG hybrid welding process of aluminum alloy[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool，2016(7)：106–109.

[4] 马国龙，雷振，马寅，等. 铝合金激光–TIG复合焊热输入对组织及性能的影响[J]. 焊接，2019(12)：7–10.
MA G L，LEI Z，MA Y，et al. Effect of heat input on microstructure and properties of laser–TIG hybrid welded aluminum alloy[J]. Welding & Joining，2019(12)：7–10.

[5] 卢帅，晁艳普，张楚翔，等. 激光–TIG复合填丝焊接工艺对6061铝合金焊缝组织与硬度的影响[J]. 制造技术与机床，2022(12)：121–126.
LU S，CHAO Y P，ZHANG C X，et al. Effect of laser–TIG hybrid filler wire welding process on weld microstructure and hardness of 6061 aluminum alloy [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool，2022(12)：121–126.

[6] 张正浩，刘天亮，刘云婷，等.2219铝合金激光–电弧复合焊接工艺优化[J]. 航天制造技术，2024(1)：16–21.
ZHANG Z H，LIU T L，LIU Y T，et al. Process optimization of laser–arc hybrid welding for 2219 aluminum alloy[J]. Aerospace Manufacturing Technology，2024(1)：16–21.

[7] 黄立进. 铝合金激光焊及激光–GMAW复合焊气孔形成机理与抑制方法研究[D]. 上海：上海交通大学，2018.
HUANG L J. Study on formation mechanism and suppression methods of porosity in laser welding and laser–GMAW hybrid welding of aluminum alloy[D]. Shanghai：Shanghai Jiao Tong University，2018.

[8] 刘婷. 6061铝合金激光–MIG复合焊接匙孔稳定性研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2021.
LIU T. Study on keyhole stability of laser–MIG hybrid welding of 6061 aluminum alloy[D]. Nanjing：Nanjing University of Aeronautics and Astronautics，2021.

[9] Ola O T，Doern F E. Keyhole–induced porosity in laser–arc hybrid welded aluminum [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2015，80(1)：3–10.

[10] 刘晓红. 铝合金激光–TIG复合焊接工艺及接头性能研究[D]. 大连：大连理工大学，2017.
LIU X H. Study on laser–TIG hybrid welding process and joint properties of aluminum alloy[D]. Dalian：Dalian University of Technology，2017.

[11] 刘福运. 磁场辅助铝合金激光–MIG复合焊气孔抑制及熔池行为研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2023.
LIU F Y. Study on porosity suppression and molten pool behavior of magnetic field–assisted laser–MIG hybrid welding of aluminum alloy[D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2023.

[12] 贺世伟. 高强铝合金激光电弧复合增材工艺优化与凝固组织演变机制[D]. 天津：中国民航大学，2024.
HE S W. Process optimization and solidification structure evolution mechanism of laser–arc hybrid additive manufacturing for high–strength aluminum alloy [D]. Tianjin：Civil Aviation University of China，2024.

[13] Aversa A，Marchese G，Saboori A，et al. New aluminum alloys specifically designed for laser powder bed Fusion：A review[J]. Materials，2019，12(7)：1007.

[14] Huang L J，Hua X M，Wu D S，et al. Effect of magnesium content on keyhole–induced porosity formation and distribution in aluminum alloys laser welding[J]. Journal of Manufacturing Processes，2018，33：43–53.

[15] 曹向琦，陈升顺，闫飞，等. 中厚板5083铝合金摆动激光–电弧复合焊工艺研究[J]. 武汉纺织大学学报，2025，38(05)：75–80.
CAO X Q，CHEN S S，YAN F，et al. Study on oscillating laser–arc hybrid welding process of 5083 aluminum alloy medium–thick plate[J]. Journal of Wuhan Textile University，2025，38(5)：75–80.